

УДК 535.4

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_7
EDN: AJMCSE

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ С ОПОРНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Н.Т. Авласевич, А.М. Ляликов*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы*

FEATURES OF FORMING HOLOGRAMS OF PERIODIC STRUCTURES IN NONCOHERENT LIGHT WITH A REFERENCE DIFFRACTION GRATING

N.T. Avlasevich, A.M. Lyalikov*Yanka Kupala State University of Grodno*

Аннотация. Рассмотрены особенности формирования голограмм периодических структур в некогерентном свете при использовании опорной дифракционной решетки. Описано устройство для реализации предложенной записи голограмм и показана возможность формирования голограмм периодических структур с произвольной настройкой полос голографической структуры в формируемой голограмме. Установлена зависимость поведения вектора решетки голографической структуры в формируемой голограмме от величины разворота опорной решетки, а также от соотношений периодов опорной решетки и исследуемой периодической структуры.

Ключевые слова: голограмма периодической структуры, некогерентный свет, опорная дифракционная решетка, вектор решетки.

Для цитирования: Авласевич, Н.Т. Особенности формирования голограмм периодических структур в некогерентном свете с опорной дифракционной решеткой / Н.Т. Авласевич, А.М. Ляликов // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 7–12. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_7. – EDN: AJMCSE

Abstract. The features of forming holograms of periodic structures in noncoherent light using a reference diffraction grating are considered. A device for realizing such recording of holograms is described, and the possibility of forming holograms of periodic structures with arbitrary adjustment of the bands of the holographic structure in the formed hologram is shown. The dependence of the behavior of the grating vector of a holographic structure in the formed hologram on the value of the rotation of the reference grating, as well as on the ratio of the periods of the reference grating and the periodic structure under study, is established.

Keywords: hologram of a periodic structure, incoherent light, reference diffraction grating, grating vector.

For citation: Avlasevich, N.T. Features of forming holograms of periodic structures in noncoherent light with a reference diffraction grating / N.T. Avlasevich, A.M. Lyalikov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 7–12. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_7 (in Russian). – EDN: AJMCSE

Введение

Объекты, характеризующиеся периодической или квазипериодической микро- и наноструктурой, относятся к особому классу, так как их оптические свойства определяются не только характеристиками материала, но и его структурой. Такие структурированные объекты нашли широкое практическое применение при создании оптических элементов для спектральных приборов высокого разрешения, различных оптических элементов волоконной оптики и современных лазерных систем. Ярким примером таких объектов являются голограммные решетки [1], используемые для коррекции аберраций в современных спектральных приборах, волоконные микрорешетки [2], нашедшие применение в различных элементах и устройствах интегральной и волоконной оптики, в системах волоконно-оптической связи и в различных типах волоконных и

жидкостных РОС-лазерах и усилителях, в системах измерения физических величин [3]–[6]. В последнее время особый интерес ученых и инженеров вызывает одно из перспективных применений структурированности свойств объекта – это прозрачный метаматериал, представляющий собой искусственно структурированную систему элементов [7]–[10].

Кроме разработки и исследования технологий структурирования различных объектов отмечен интерес и к измерительному контролю параметров таких объектов [11]. Одним из перспективных направлений диагностики периодически структурированных объектов является оптическая голографическая интерферометрия периодических структур [12]–[16].

Для записи голограмм периодических структур обычно используют источники когерентного света. Особенностью записи голограмм

периодических структур является возможность формирования световых пучков, записывающих голограмму, дифрагирующих непосредственно на самой периодической структуре. Таким образом возникает возможность создания пары волн для формирования голограммы без необходимости использования опорного пучка. Такая особенность позволяет использовать, в отличие от голографической интерферометрии фазовых или рассеивающих объектов, некогерентное освещение. В этом случае реализация устройств записи голограмм значительно упрощается, так как отсутствует в оптической системе опорная ветвь, а лазерный источник света заменяется более дешевым светодиодом или галогенной лампой. Существенным недостатком схем записи голограмм периодических структур одним пучком некогерентного света является проблематичность получения произвольной настройки полос голографической структуры в формируемой голограмме периодической структуры.

Запись голограмм любых объектов, включая и периодические структуры, парой когерентных световых пучков позволяет на стадии формирования голограммы объекта практически произвольным образом регулировать настройку полос голографической структуры. Однако для такой реализации оптическая схема усложняется из-за необходимости создания опорной ветви, обеспечивающей произвольное регулирование направления опорного пучка по отношению к объектному.

При формировании голограмм двумя световыми пучками необходимым условием реализации записи голограммы является высокая пространственно-временная когерентность источника света. Существуют несколько вариантов реализации записи голограмм, для которых регулирование изменения направлений распространения световых волн при формировании голограммы, позволяет задавать произвольную пространственную частоту полос и, соответственно, направление полос в формируемой голографической структуре. В частности используются схемы формирования световых пучков, записывающих голограмму периодической структуры, как с отдельной опорной волной, не взаимодействующей с периодической структурой, так и опорной волной, дифрагированной на структуре [12], [16].

В оптических схемах записи голограмм одним пучком света возможно применение некогерентных источников света. В данном случае, как это было ранее доказано для фазовых объектов, значительно улучшается качество голограмм по сравнению с их записью при когерентном освещении [13]. Ранее такая запись голограмм применялась при перезаписи голограмм фазовых объектов. Для периодических структур такой подход позволил разработать метод голографической интерферометрии динамических периодических

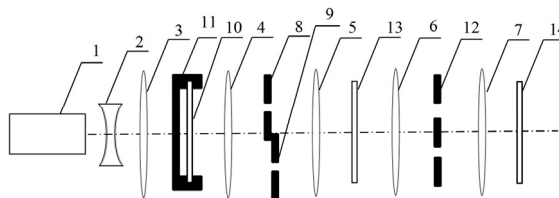
структур в некогерентном свете [14]. Сущность метода заключается в формировании интерференционных картин, отображающих пространственное поведение периодической структуры объекта во времени, с применением записи и последующим восстановлением опорной голограммы периодической структуры в некогерентном свете световыми волнами, дифрагированными непосредственно на исследуемой структуре. Недостаток такой записи голограмм – существенное ограничение регулирования пространственной частоты полос голографической структуры.

Для устранения такого недостатка в голографической интерферометрии ранее было предложено использовать в схемах дополнительно прозрачную решетку, согласованную по несущей частоте с перезаписываемой голограммой [13]. Дополнительная прозрачная решетка устанавливалась обычно перед перезаписываемой голограммой в оптически сопряженной плоскости. Такой простой прием при формировании голограмм в некогерентном свете был впервые предложен и успешно реализован в системах перезаписи голограмм с целью повышения чувствительности фазовых измерений [13].

В данной работе рассмотрены особенности формирования голограмм периодических структур в некогерентном свете при использовании опорной дифракционной решетки. Описано устройство для реализации такой записи голограмм и показана возможность формирования голограмм периодических структур с произвольной настройкой полос голографической структуры в формируемой голограмме периодической структуры.

1 Экспериментальная установка

На рисунке 1.1 приведена оптическая схема экспериментальной установка устройства для реализации записи голограмм периодических структур одним пучком некогерентного света с возможностью произвольного регулирования величины и направления полос формируемой голографической структуры.



1 – источник некогерентного света;
2 – рассеивающая линза; 3, 4, 5, 6, 7 – объективы;
11 – специальный держатель с возможностью разворота вокруг оптической оси устройства;
10 – опорная дифракционная решетка; 8, 9, 12 – экраны с отверстиями; 13 – исследуемая периодическая структура; 14 – голограмма
Рисунок 1.1 – Оптическая схема устройства записи голограмм

С помощью некогерентного источника света 1 (рисунок 1.1) и оптической системы, выполненной, например, в виде телескопа, образованного рассеивающей 2 и собирающей 3 линзами, формируют коллимированный световой пучок и освещают им опорную прозрачную дифракционную решетку 10, которая установлена в оптический держатель 11. На выходе прозрачной дифракционной решетки 10 формируется система дифрагированных световых пучков, расположенных в плоскости, перпендикулярной штрихам решетки. Разворот плоскости, в которой сформирована система дифрагированных пучков, осуществляется разворотом прозрачной дифракционной решетки 10 посредством оптического держателя 11.

Световые пучки объективом 4 фокусируются в плоскости экранов 8 и 9 первой оптической фильтрующей системы. Разворотом прозрачной дифракционной решетки 10 и отверстиями экранов 8 и 9 за счет их перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси устройства, выбирается пара световых пучков, которые коллимируются объективом 5 и освещают исследуемую периодическую структуру 13. Таким образом, образуется пара взаимно когерентных световых пучков с возможностью произвольного регулирования направления их распространения. Посредством данной пары световых пучков освещают исследуемую периодическую структуру 13. В задней фокальной плоскости объектива 6 парой отверстий в экране 12 выделяют два световых пучка, дифрагированных на исследуемой структуре, например, в +1-ый и –1-ый порядки. Выделенные световые пучки коллимируют объективом 7 и на регистраторе записывают голограмму 14 исследуемой периодической структуры 13.

2 Формирование голограмм в некогерентном свете с использованием опорной дифракционной решетки

Сущность способа записи голограмм заключается в использовании при формировании голограммы периодической структуры дополнительной опорной решетки 10, установленной перед исследуемой периодической структурой 13 в оптически сопряженной плоскости. Такая опорная решетка позволяет сформировать пару световых пучков, которые выделяются экранами 8 и 9 и освещают исследуемую периодическую структуру 13. Вращение опорной решетки в держателе 11 позволяет изменять вокруг оптической оси устройства плоскость, в которой лежит данная пара световых пучков произвольным образом от 0 до 2π .

Для описания сущности способа введем следующие обозначения: \mathbf{R} – вектор опорной решетки; \mathbf{X}_S – вектор решетки исследуемой периодической структуры; \mathbf{R}_G – вектор решетки формируемой голографической структуры.

Используя подход авторов [14], [15] для описания структурированных изображений интерференционных картин или голограмм под вектором решетки для плоской дифракционной решетки, периодической структуры или интерференционной структуры, будем понимать вектор, расположенный в плоскости объекта (решетки, структуры или голограммы) и направленный перпендикулярно полосам или штрихам структуры, причем модуль вектора обратно пропорционален периоду структуры или расстоянию между ближайшими интерференционными полосами. Так как период полос интерференционной картины или голографической структуры, при их формировании парой световых пучков, зависит не только от угла между интерферирующими пучками, но и от длины волны λ , а при описании дифракции света на периодической структуре или дифракционной решетке, угол дифракции света зависит от периода структуры и длины волны λ , то для описания векторов решетки будем учитывать данную особенность при определении его модуля. Так как в оптическую схему устройства записи голограмм периодических структур (рисунок 1.1) входят ряд объективов, в частности, для формирования дифракционного спектра опорной решетки – объектив 5 и выделения пары волн, освещающей посредством объектива 6 исследуемую периодическую структуру 13, а также объективов 6, 7 и отверстий в экране 12 для выделения пары световых волн, формирующих голограмму 14, то очень удобно условно принять за модуль вектора решетки расстояние между определенными точками в фокальной плоскости объективов. В этом случае, независимо от процесса дифракции на эталонной решетке или периодической структуре, или процесса формирования голограммы, за модуль вектора условно можно принять расстояние между +1-ым и 0-ым порядками дифракции света в задних фокальных плоскостях объективов 4 и 6 соответственно для векторов \mathbf{R} и \mathbf{X}_S , а расстояние между отверстиями в экране 12, расположенном в задней фокальной плоскости объектива 6, для вектора \mathbf{R}_G . В этом случае, с учетом того, что фокусные расстояния f всех объективов одинаковы, модули векторов \mathbf{R} , \mathbf{X}_S и \mathbf{R}_G определяются следующим образом:

$$\mathbf{R} = \frac{f\lambda}{T_0}, \quad \mathbf{X}_S = \frac{f\lambda}{T_S}, \quad \mathbf{R}_G = \frac{f\lambda}{T_G},$$

где T_0 , T_S и T_G – периоды опорной решетки, исследуемой периодической структуры и формируемой голограммы соответственно.

На рисунке 2.1 приведена схема, поясняющая положение вектора \mathbf{R}_G решетки формируемой голографической структуры от угла разворота φ , векторов \mathbf{X}_S решетки исследуемой структуры и \mathbf{R} опорной решетки. Предполагается, что штрихи исследуемой структуры ориентированы

параллельно оси OY , т. е. вектор решетки ориентирован параллельно оси OX . Точка O расположена на главной оптической оси устройства и соответствует центру светового пучка, освещающего опорную решетку 10 (рисунок 1.1). Вследствие дифракции этого пучка на опорной решетке в задней фокальной плоскости объектива 4 на экранах 8, 9 точками A и B (рисунок 2.1) отмечены положения $+1$ -ом и -1 -ом дифракционных максимумов. Данные максимумы отверстиями в экранах 8, 9 (рисунок 1.1) отделяются от других максимумов дифракции, в частности от 0 -го, отмеченного на рисунке 2.1 точкой O , и формируют пару световых пучков, освещающих исследуемую 13 периодическую структуру. В задней фокальной плоскости объектива 6 (рисунок 1.1) каждый световой пучок после прохождения периодической структуры формирует разнесенные в пространстве картины дифракционных максимумов. В этом случае на экране 12 точка B (рисунок 2.1) соответствует 0 -му порядку дифракции, а точки C_{+1} и C_{-1} – $+1$ -му и -1 -му порядкам дифракции света на периодической структуре для первого освещающего пучка и, соответственно, точка A (рисунок 2.1) соответствует 0 -му порядку дифракции, а точки D_{+1} и D_{-1} – $+1$ -му и -1 -му порядкам дифракции света на периодической структуре для второго светового пучка. Для формирования голограммы 14 (рисунок 1.1) отверстиями в экране 12 выделяется пара световых пучков. Здесь возможны несколько вариантов формирования голограммы. Можно выбирать 0 -ой порядок дифракции и любой другой ($+1$ -ый и -1 -ый). Однако наиболее оптимальным является выбор комплексно-сопряженных волн из первой и второй дифракционных картин, например, волн, соответствующих порядкам дифракции, отмеченным точками C_{+1} и D_{-1} . Эти световые волны одинаковой амплитуды, а фазовые искажения, несущие информацию о регулярности периодической структуры, имеют взаимно противоположные знаки. В отличие от случая, когда голограмма формируется 0 -ым и 1 -ым порядками дифракции, при формировании $+1$ -ым и -1 -ым порядками произойдет двукратное усиление фазовых искажений, период полос голографической структуры уменьшится в два раза.

Положения векторов решеток на рисунке 2.1 будет соответствовать:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{OB}, \\ \mathbf{X}_S &= \mathbf{BC}_{+1}, \\ \mathbf{R}_G &= \mathbf{D}_{-1}\mathbf{C}_{+1}. \end{aligned}$$

Определим закономерность изменения модулей вектора \mathbf{R}_G от \mathbf{R} , \mathbf{X}_S и переменной α , соответствующей углу разворота вектора опорной решетки по отношению к вектору исследуемой периодической структуры. Полнос полярной системы координат совместим с главной оптической осью устройства. Из рисунка 2.1 получим следующее уравнение

$$\mathbf{R}_G^2 = \mathbf{R}^2 \sin^2 \alpha + (\mathbf{R} \cos \alpha + \mathbf{X}_S)^2, \quad (2.1)$$

От уравнения (2.1) перейдем к зависимости модуля R_G от переменной φ , которая определяет угол между векторами \mathbf{R}_G и \mathbf{X}_S .

$$\mathbf{R}_G^2 - 4\mathbf{R}_G\mathbf{X}_S \cos \varphi + (2\mathbf{X}_S)^2 = (2\mathbf{R})^2 \quad (2.2)$$

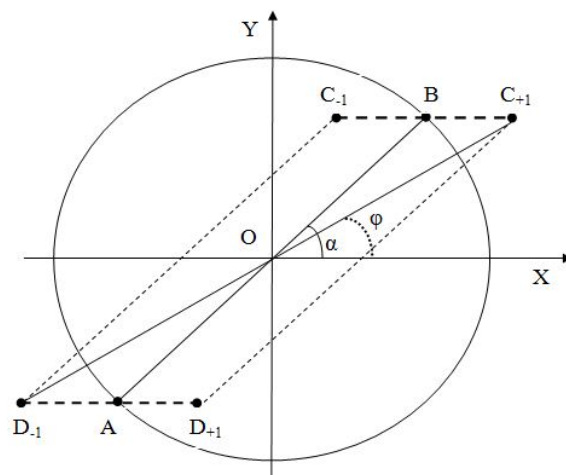


Рисунок 2.1 – Схема, поясняющая положение вектора \mathbf{R}_G решетки формируемой голографической структуры от углов разворота вектора \mathbf{R} относительно \mathbf{X}_S

Из уравнения (2.2) следует, что конец вектора решетки голографической структуры описывает окружность. Так как в реальном случае в устройстве записи голограмм (рисунок 1.1) используются опорная решетка и исследуемая периодическая структура с фиксированными периодами T_0 и T_S , то в зависимости от их соотношений и соответственно от соотношений модулей векторов $\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{X}_S}$, возможны как количественные, так и качественные отличия в поведении вектора \mathbf{R}_G .

На рисунках 2.2, а) – в) приведены графики зависимости величины \mathbf{R}_G от φ для различных значений параметра

$$C = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{X}_S}. \quad (2.3)$$

Во всех случаях графики соответствуют окружностям, которые описывает конец вектора \mathbf{R}_G . Однако видно, что только в случае $\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{X}_S} > 1$

направление вектора \mathbf{R}_G изменяется в диапазоне от 0 до 2π . Если требуется изменение модуля вектора от 0 до некоего конкретного значения, то здесь очевидно соотношение $\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{X}_S} = 1$. В случае

$\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{X}_S} < 1$. Угол изменения вектора \mathbf{R}_G ограничен и легко определяется из графика (рисунок 2.2, в).

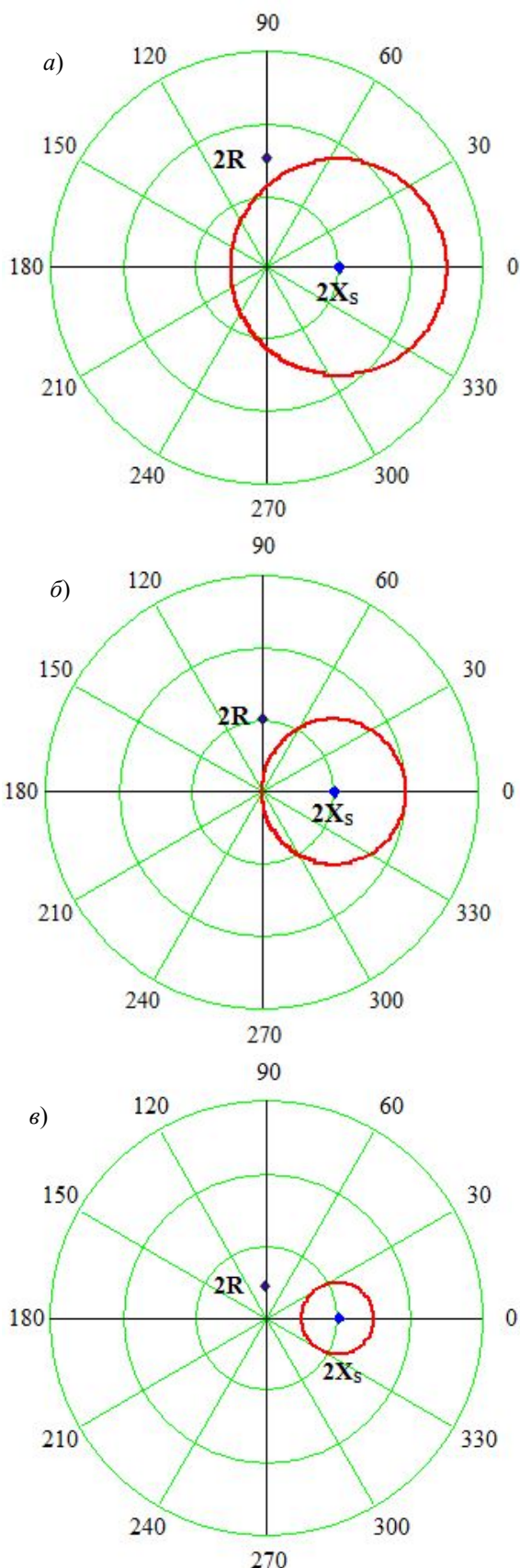


Рисунок 2.2 – Графики зависимости величины R_G от соотношения (2.3):
 а) $C = 1,5$; б) $C = 1$; в) $C = 0,5$

Заключение

Таким образом, рассмотрены особенности формирования голограмм периодических структур в некогерентном свете при использовании опорной дифракционной решетки.

Установлено, что в данной схеме при формировании голограммы периодической структуры конец вектора R_G решетки голографической структуры описывает окружность, при этом обнаружена количественная и качественная зависимость поведения вектора R_G от параметра (2.3), определяемого соотношением периодов структур опорной решетки и исследуемой периодической структуры. Показано, что только в случае $\frac{R}{X_S} > 1$ направление вектора R_G изменяется в диапазоне от 0 до 2π .

ЛИТЕРАТУРА

1. Муслимов, Э.Р. Теоретическое исследование свойств вогнутой пропускающей голограммной дифракционной решетки / Э.Р. Муслимов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 – С. 1–6.
2. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.В. Васильев [и др.] // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085–1103.
3. Long-period grating fiber sensor with in situ optical source for remote sensing / D. Viegas [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2010. – Vol. 22, № 20. – P. 1533–1535.
4. Тарасов, Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения / Л.В. Тарасов. – Москва: Радио и связь, 1981. – 440 с.
5. Liao, C.R. Review of Femtosecond Laser Fabricated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Sensing / C.R. Liao // Photonic Sensors. – 2013. – Vol. 3, № 2. – P. 97–101.
6. Оптический узкополосный фильтр на основе брэгговской решетки, записанной в микроканальном волноводе, заполненном фотополимером / И.Ю. Денисюк [и др.] // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 3. – С. 87–91.
7. Веселаго, В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ / В.Г. Веселаго // УФН. – 1967. – Т. 92, № 7. – С. 517–526.
8. Отражение света от брэгговской решетки металлических нановключений AsSb в матрице AlGaAs / В.И. Ушанов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 8. – С. 1043–1047.
9. Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies / N. Liu [et al.] // Nature Materials. – 2008. – Vol. 7. – P. 31–37.
10. Исследование оптических свойств наноструктур методом модуляционной интерференционной микроскопии / П.С. Игнатъев [и др.] //

Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 1. – С. 26–31.

11. Ляликов, А.М. Контроль качества композитных дифракционных элементов с возможностью визуализации дефектов отдельных компонент / А.М. Ляликов // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41, № 13. – С. 56–63.

12. Авласевич, Н.Т. Запись голограмм периодических структур двумя пучками когерентного света / Н.Т. Авласевич, А.М. Ляликов // Квантовая электроника: материалы XII Международ. научн.-техн. конф., Минск, 18–22 ноября, 2019 г. / РИВШ; редкол.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2019. – С. 28–30.

13. Ляликов, А.М. Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов / А.М. Ляликов. – Гродно. – ГрГУ, 2010. – 215 с.

14. Ляликов, А.М. Регулирование чувствительности измерений в голографической интерферометрии динамических периодических структур / А.М. Ляликов, Н.Т. Авласевич // Оптический журнал. – 2019. – Т. 86, № 3. – С. 56–60.

15. Авласевич, Н.Т. Особенности формирования голограмм периодических структур при пространственно-когерентном освещении /

Н.Т. Авласевич, А.М. Ляликов // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. – Москва: НИЯУ «МИФИ», 2021. – С. 463–464.

16. Авласевич, Н.Т. Запись голограмм периодических структур пространственно некогерентным светом с произвольной ориентацией полос структуры / Н.Т. Авласевич, А.М. Ляликов // Квантовая электроника: материалы XIII Международ. научн.-техн. конф., Минск, 22–26 ноября, 2021 г., БГУ; редкол.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2021. – С. 44–45.

17. Голографическая интерферометрия фазовых объектов / А.К. Бекетова [и др.]; под ред. Г.И. Мишина. – Л.: Наука, 1979. – 232 с.

18. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Оптика / Д.В. Сивухин. – Москва: Наука, 1980. – 751 с.

Поступила в редакцию 13.04.2022.

Информация об авторах

Авласевич Наталья Тадеушевна – старший преподаватель
Ляликов Александр Михайлович – д.ф.-м.н., профессор